

Математическая модель профиля резьбы, полученной мерным инструментом

С.С. Некрасов • Д.А. Жигилий • Д.А. Пылыпив

Сумской государственный университет, Украина

Received: 05 March 2018 / Accepted: 17 April 2018

Аннотация. В статье представлена математическая зависимость описывающая профиль резьбы, получаемый методом обработки мерным инструментом на фрезерном станке с ЧПУ, который имеет максимальную производительность при больших шагах резьбы и малых диаметрах.

Дальнейшие исследования направлены на возможность математического описания получаемого профиля, поскольку известны только графические способы построения образуемого профиля резьбы методом огибания, что в свою очередь расширяет конструкторские возможности при необходимости создания винтовых поверхностей с крупным шагом.

Использование полученной зависимости предоставило возможность оценить профиль поверхности получаемой указанным методом. Проведено исследование по определению отклонения формируемого профиля поверхности от заданного профиля резьбы. Определены параметры профиля резьбы, параметры траектории формообразующей точки, которые оказывают наибольшее влияние на величину отклонения

Ключевые слова: внутренняя резьба, мерный инструмент, максимальное отклонение, профиль резьбы, механическая обработка, метод огибания.

Введение

В условиях рыночной экономики основной тенденцией современного машиностроения является повышение производительности изготовления деталей. Это так же актуально и для узкоспециализированной области изготовления горнодобывающего бурового инструмента. Некоторые конструкции бурового инструмента имеют разъемные резьбовые соединения, при этом исходя из сложных условий работы такие соединения имеют большие шаги резьбы. Развитие высокопроизводительного способа обработки внутренней резьбы мерным инструментом [1] связано с увеличением количества исследований в этой области [2, 3, 4]. Все эти исследования направлены на увеличение производительности указанного способа и расширение его технологических возможностей. Вопросы производительности способа обработки резьбы мерным инструментом касаются лишь возможности корректировки траектории движения формообразующей точки, что позволяет использовать инструмент при больших значениях износа режущих кромок. Изучение возможностей указанного способа позволило установить возможность получения не только круглой резьбы, но и метрической, дюймовой, трапецеидальной. Теоретические исследования данного способа рассматриваются исключительно в графическом способе решения определенных задач.

Способ обработки резьбы с крупным шагом обеспечивает увеличение производительности в 2 – 13 раз, как показано в работе [5] по сравнению с другими распространенными способами фрезерования и точения внутренних резьб.

Анализ последних исследований

Обработке внутренних резьб посвящено много исследований ведущих ученых из-за сложности снятия больших объемов припуска при малой жесткости инструмента. Исследования стружкообразования по генераторной схеме резания описаны в [6, 7]. Моделирование обработки резьб методом копирования путем огибания профиля резцовыми фрезами описано в работе [8]. В тоже время, исследование обработки резьб с несимметричным профилем описано в работе [9].

Возможность обработки различных типов резьб рассмотрена в работе [3]. Рассмотрено, что способ [1] позволяет обрабатывать не только круглые резьбы с большим шагом, но и другие типы резьб, при этом

существуют ограничения при обработке метрической и трапецидальной резьб в зависимости от их шага, а также указано, что способ позволяет обрабатывать все диапазоны дюймовых и круглых резьб.

Получение математического описания образуемого профиля было частично рассмотрено в работе [4]. Проведенные исследования дали возможность установить диаметр инструмента и диаметр траектории движения инструмента, но авторам так и не удалось получить математическую зависимость, описывающую поверхность которую можно получить в результате обработки и изменении параметров фрезерования.

Авторами работы [2] показано, что изменением траектории движения формообразующей точки, возможно, добиваться компенсации значительных износов режущих кромок при сохранении заданной геометрии резьбовой поверхности.

Постановка проблемы

Из рассмотренных источников следует, что способ обработки внутренней резьбы мерным инструментом со стандартным профилем режущих пластин нуждается в более подробных исследованиях по определению математических зависимостей, связывающих шаг, форму профиля резьбы, допуск погрешности изготовления с размерами инструмента и параметрами настройки оборудования. Настройка оборудования заключается в определении параметров спиральной траектории для обработки внутренней резьбы конкретного типоразмера, поэтому тема данного исследования является актуальной.

Цель работы

Получение математической зависимости, описывающей резьбовую поверхность, получаемую способом обработки внутренней резьбы мерным инструментом со стандартным профилем режущих пластин.

Основная часть

Способ обработки внутренней резьбы мерной фрезой при вращении вокруг своей оси и движении по спиральной траектории сообщает движение формообразующей точке по окружности в конкретный момент

времени, диаметр которой равен диаметру фрезы. Дополнительное движение инструмента по спиральной траектории позволяет за счет совмещения этих двух движений создавать винтовую поверхность. При этом форма этой поверхности остается неизвестной. Для установления геометрии образуемой поверхности необходимо рассмотреть движение формообразующей точки в заданных условиях (рис. 1)

Проекция образующей резьбу точки на плоскость XOY глобальной декартовой системы координат XYZ в ней движется по радиус-вектору \bar{R} эксцентричной окружности с подвижным центром O_ϕ - годографом радиус-вектора спиральной траектории \bar{R}_ϕ . \bar{R}_K - радиус-вектор образующей резьбу точки от центра резьбы до точек контура поперечного сечения резьбы в плоскости XOY, учитывающий параметры относи-

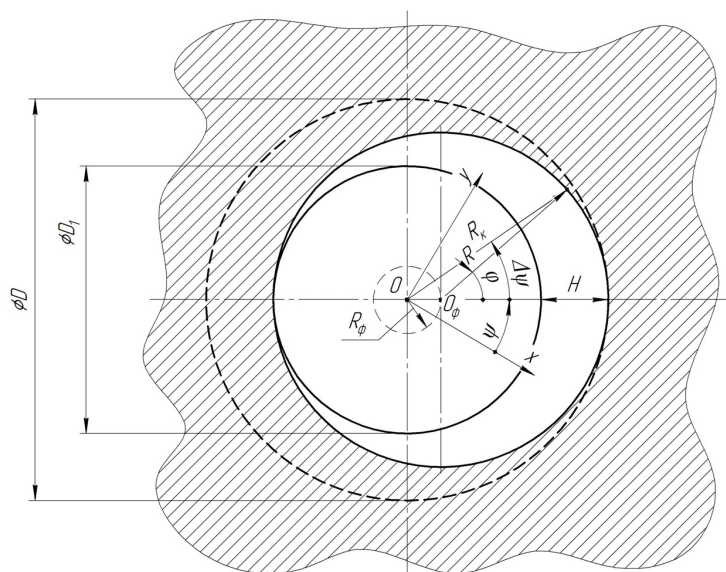


Рис. 1. Схематический профиль поперечного сечения резьбы в полярной системе координат $r, \Delta\psi$

тельного движения мерной фрезы в системе отверстия резьбы, определяется как:

$$R = D_{\text{И}}/2, \quad (1)$$

где $D_{\text{И}}$ - диаметр мерного инструмента.

Тогда упомянутые вектора, очевидно, имеют координаты:

$$\begin{aligned} \bar{R}_\phi &= (R_\phi \cdot \cos(\psi); R_\phi \cdot \sin(\psi)); \\ \bar{R} &= (R \cdot \cos(\psi + \phi); R \cdot \sin(\psi + \phi)); \\ \bar{R}_K &= \bar{R}_\phi + \bar{R} = (R_\phi \cdot \cos(\psi) + R \cdot \cos(\psi + \phi); R_\phi \cdot \sin(\psi) + R \cdot \sin(\psi + \phi)), \end{aligned} \quad (2)$$

имея в виду, что вектор \bar{R} поворачивается относительно вектора \bar{R}_ϕ в процессе образования профиля на угол ϕ , называемый угловым шагом формообразующей точки резбы, а \bar{R}_ϕ поворачивается в системе координат XOY на угол ψ , который назовем угловым шагом формообразующей спирали резбы.

Назначим также полярную систему координат $r \Delta\psi$, в которой луч r направлен из т.О в т.О $_\phi$. Угол $\Delta\psi$ измеряется аналогично ψ и запаздывает относительно него на угол ϕ (рисунок 1). Заметим, что ось r является осью симметрии для системы образующих окружностей по построению.

Следовательно, модуль вектора \bar{R}_K составит:

$$\begin{aligned} R_K &= \sqrt{(\bar{R}_\phi + \bar{R})^2} = \sqrt{(R_\phi \cdot \cos(\psi) + R \cdot \cos(\psi + \phi))^2 + (R_\phi \cdot \sin(\psi) + R \cdot \sin(\psi + \phi))^2} = \\ &= \sqrt{R_\phi^2 \cdot (\cos^2(\psi) + \sin^2(\psi)) + R^2 \cdot (\cos^2(\psi + \phi) + \sin^2(\psi + \phi)) + 2 \cdot R_\phi \cdot R \cdot (\cos(\psi) \cdot \cos(\psi + \phi) + \sin(\psi) \cdot \sin(\psi + \phi))} = \\ &= \sqrt{R_\phi^2 + R^2 + 2 \cdot R_\phi \cdot R \cdot \cos(\psi - (\psi + \phi))} = \sqrt{R_\phi^2 + R^2 + 2 \cdot R_\phi \cdot R \cdot \cos(\phi)}. \end{aligned} \quad (3)$$

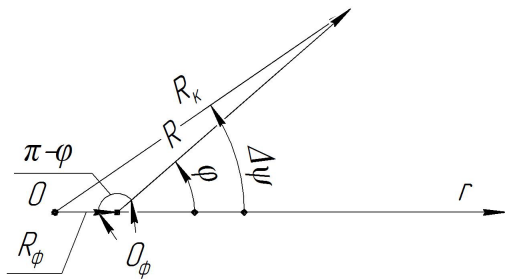


Рис. 2. Векторная сумма $\bar{R}_K = \bar{R}_\phi + \bar{R}$

Проекция годографа вектора \bar{R}_K на плоскость XOY точно образует периметр окружности мерного инструмента. Следовательно, профиль резбы можно однозначно поставить в соответствие координате z так, чтобы полному обороту вектора \bar{R}_K соответствовал угол $\Delta\psi = 2 \cdot \pi$ рад, где $\Delta\psi = \angle(\bar{R}_\phi; \bar{R}_K)$, то есть $\Delta\psi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{z}{p \cdot n}$, где n число заходов резбы. Далее рассматриваются крепёжные резбы с числом заходов $n = 1$.

Вычислительную сложность представляет лишь нахождение соответствия между углами $\Delta\psi$ и ϕ . Для этого рассмотрим треугольник векторов $\bar{R}_K = \bar{R}_\phi + \bar{R}$ и воспользуемся теоремой синусов.

$$\begin{aligned} \frac{R}{\sin(\Delta\psi)} &= \frac{R_K}{\sin(\pi - \phi)}; \\ \frac{R}{\sin(\Delta\psi)} &= \frac{\sqrt{R_\phi^2 + R^2 + 2 \cdot R_\phi \cdot R \cdot \cos(\phi)}}{\sin(\phi)}; \\ \sin^2(\phi) &= \sin^2(\Delta\psi) \cdot \left(\left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 + 1 + 2 \cdot \frac{R_\phi}{R} \cdot \cos(\phi) \right); \\ 1 - \cos^2(\phi) - \sin^2(\Delta\psi) \cdot \left(\left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 + 1 \right) - 2 \cdot \frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) \cdot \cos(\phi) &= 0; \\ \cos^2(\phi) + 2 \cdot \frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) \cdot \cos(\phi) + \sin^2(\Delta\psi) \cdot \left(\left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 + 1 \right) - 1 &= 0; \\ \cos(\phi) &= \frac{-2 \cdot \frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) \pm \sqrt{4 \cdot \left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 \cdot \sin^2(\Delta\psi) - 4 \cdot \left[\sin^2(\Delta\psi) \cdot \left(\left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 + 1 \right) - 1 \right]}}{2}; \\ \cos(\phi) &= -\frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) \pm \sqrt{\left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 \cdot \sin^2(\Delta\psi) - \left[\sin^2(\Delta\psi) \cdot \left(\left(\frac{R_\phi}{R} \right)^2 + 1 \right) - 1 \right]}; \\ \cos(\phi) &= -\frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) \pm |\cos(\Delta\psi)|. \end{aligned}$$

Пусть $0 \leq \Delta\psi \leq \pi$, тогда из рисунка 1 следует:

$$\cos(\phi) = -\frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) + \cos(\Delta\psi), \quad (4)$$

Тогда

$$R_K = \sqrt{R_\phi^2 + R^2 + 2 \cdot R_\phi \cdot R \cdot \left[-\frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2(\Delta\psi) + \cos(\Delta\psi) \right]}. \quad (5)$$

Также запишем, вследствие симметрии системы относительно оси z полярной системы координат, дополнительные условия:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \Delta\psi \leq \pi; \\ R_K(\Delta\psi) &= R_K(-\Delta\psi), \end{aligned} \quad (6)$$

это следует и непосредственно из функции $R_K(\Delta\psi)$.

Преобразовав полученное уравнение (5) относительно координаты z вдоль оси резбы для однозаходной резбы получим **математическую модель**:

$$R_K = \sqrt{R_\phi^2 + R^2 + 2 \cdot R_\phi \cdot R \cdot \left[-\frac{R_\phi}{R} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi z}{p}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{p}\right) \right]}. \quad (7)$$

Следует отметить, что в технических терминах ГОСТа здесь $R_\phi = \frac{H}{2}$ и $R = \frac{D}{2} - R_\phi$, где D – номинальный диаметр резбы и H – высота профиля резбы.

Полученная зависимость (7) позволяет точно построить профиль образуемой резбы в зависимости от диаметра инструмента и диаметра спиральной траектории по которой движется инструмент.

Подставляя в полученное уравнение (7) данные для круглой резбы R32 по ISO 10208 для которой шаг $p=12,7$ мм, глубина профиля $H=1,5$ мм, номинальный диаметр $D=32$ мм, радиус спиральной траектории R_ϕ :

$$R_\phi = \frac{H}{2} = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ (мм)}$$

$$R = \frac{32}{2} - 0,75 = 15,25 \text{ (мм)}$$

получим уравнение, описывающее получаемую кривую для круглой резбы R32 по ISO 10208:

$$R_K = \sqrt{0,75^2 + 15,25^2 + 2 \cdot 0,75 \cdot 15,25 \cdot \left[-\frac{0,75}{15,25} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi \cdot z}{12,7}\right) + \cos\left(\frac{2\pi \cdot z}{12,7}\right) \right]}. \quad (8)$$

выполнив преобразования уравнения (8), получим:

$$R_K = \sqrt{233,125 + 22,875 \cdot \left[-\frac{3}{61} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot z}{6,35}\right) + \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{6,35}\right) \right]}. \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает кривую, находящуюся между номинальным профилем резбы и его верхним отклонением (см. рис. 3).

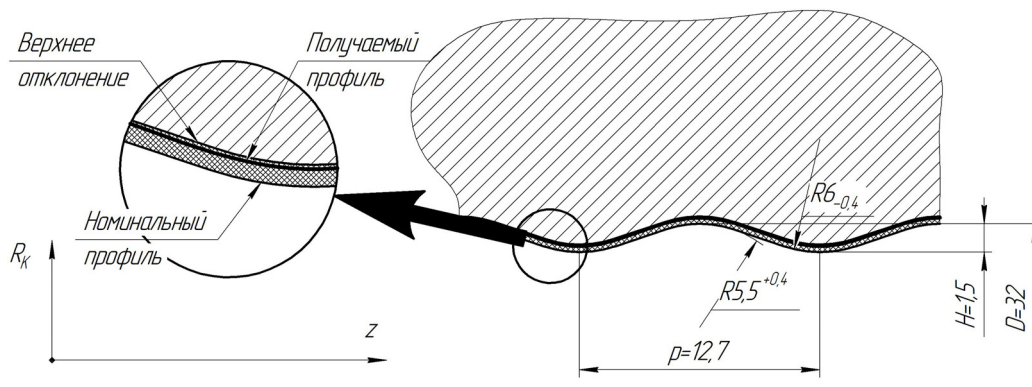


Рис. 3. Образование профиля круглой резбы R32 по ISO10208 по уравнению (9)

Рассматривая полученное уравнение (7) применительно к метрической резбе, можно установить возможность получения метрических резб рассматриваемым способом. Для примера взята резба M64×6-7H для которой шаг $p=6,0$ мм, глубиной профиля $H=4,76$ мм, номинальный диаметр $D=64$ мм, радиус спиральной

траектории $R_{\phi}=3,81$ мм и диаметр инструмента $D_H=60,48$ мм подобраны таким образом, чтобы получаемый профиль находился в середине допуска на профиль резьбы. Соответственно по уравнению (2) параметр R в уравнении (7) будет равен:

$$R = \frac{60,48}{2} = 30,24 \text{ (мм)}$$

тогда уравнение (7), описывающее получаемую кривую для метрической резьбы М64×6-7Н примет вид:

$$R_K = \sqrt{3,81^2 + 30,24^2 + 2 \cdot 3,81 \cdot 30,24 \cdot \left[-\frac{3,81}{30,24} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi \cdot z}{6}\right) + \cos\left(\frac{2\pi \cdot z}{6}\right) \right]}. \quad (10)$$

выполнив преобразования уравнения (10), получим:

$$R_K = \sqrt{928,97 + 230,43 \cdot \left[-\frac{127}{1008} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi z}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi z}{3}\right) \right]}. \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает кривую, находящуюся между номинальным профилем резьбы и его верхним отклонением (см. рис. 4).

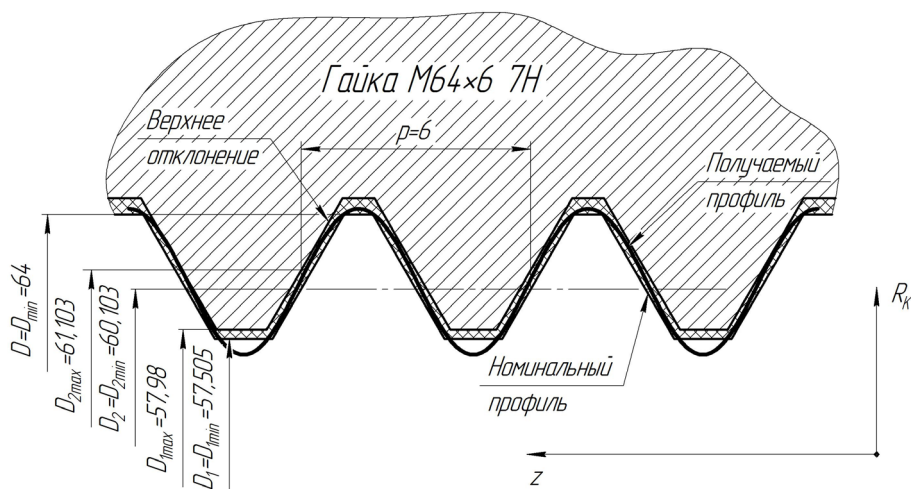


Рис. 4. Образование профиля метрической резьбы М64×6 7Н по уравнению (11)

Как видно из рис. 4, описывающая получаемый профиль резьбы кривая выходит за пределы внутреннего диаметра, но поскольку этот диаметр формируется на операциях, предшествующих нарезанию резьбы, то это не вносит ограничений в использование метода огибания для получения метрической резьбы.

Исходя из проведенных исследований возможности получения различных профилей резьб с использованием полученной математической модели профиля резьбы в зависимости от параметров резьбы, траектории движения инструмента и диаметра мерного инструмента, было установлено, что способом огибания возможно получение метрической, дюймовой и круглой резьб во всех диапазонах шагов.

Выводы

1. Получена математическая зависимость для любых типоразмеров внутренних резьб, которая позволяет определить получаемый профиль винтовой поверхности в зависимости от диаметра инструмента и траектории его движения.

2. Установлена возможность получения метрической, дюймовой и круглой резьб в любых диапазонах.

Дальнейшие исследования направлены на изучение возможности получения других типов резьб при более сложных траекториях движения инструмента.

Математична модель профіля різі, отриманого мірним інструментом

Некрасов С.С., Жигилій Д.О., Пилипів Д.А.

Анотація. В статті представлена математична залежність, що описує профіль різі, отриманого методом обробки мірним інструментом на фрезерному верстаті з ЧПК, який має максимальну продуктивність при великих кроках різі та малих діаметрах.

Подальші дослідження спрямовані на можливість математичного описання отриманого профілю, оскільки відомі лише графічні способи побудови профілю що отримується методом огинання, що в свою чергу розширює конструкторські можливості при необхідності створення гвинтових поверхонь з великим кроком.

Використання отриманої залежності надало змогу оцінити профіль поверхні, що отримується вказаним методом. Проведено дослідження по визначенню відхилення профілю що формується, від заданого профілю різі. Визначені параметри профіля різі, параметри траєкторії формообразуючої точки, які мають найбільший вплив на величину відхилення.

Ключові слова: внутрішня різь, мірний інструмент, максимальне відхилення, профіль різі, механічна обробка, метод огинання

The mathematical representation of the thread profile made with crop-to-size tool

S.S. Nekrasov, D.O. Zhyhylii, D.A. Pylypiv

Abstract. The paper is concerned with a mathematical representation of the thread profile obtained by mechanical crop-to-size tooling method on a computer numerical controlled (CNC) mill machine that has maximal output of a large pitch of a screw thread and small diameters.

Further research is aimed at the possible mathematical formulation of the gained thread profile, since graphic methods for profile constructing are the only known by rounding method, which in turn expands the design possibilities when it is necessary to create screw surfaces with a large step

The use of this dependence provides an opportunity to assess the screw thread profile obtained by this method. The conducted study determines the deviation of the formed surface profile from a given thread profile. The thread profile parameter and the parameters of the shape-generating point trajectory, having the major influence on the deviation value, are determined.

Keywords: internal thread, crop-to-size tool, major deviation, screw thread profile, mechanical operation, rounding method

References

1. Некрасов С.С., Криворучко Д.В., Нешта А.О., власник Сумський Державний Університет - № а201214037 (2013), Спосіб обробки круглої внутрішньої різби, НКІ, Київ, Україна, Пат. 103734.
2. Некрасов С.С. Исследование возможности коррекции размеров круглой резьбы при обработке мерным инструментом / Некрасов С.С., Агеева Е.А. //ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК. -Сумы: СумГУ. - 2016. - Том 3, №1. - С. 34 - 37.
3. Нешта А.А. Область применения метода обработки внутренней резьбы мерным инструментом / Нешта А.А., Криворучко Д.В.//Вісник НТУ «ХПІ». Х.: НТУ „ХПІ”, 2015. - № 4. - С. 145 - 149.
4. Нешта А.А. Особенности обработки различных типов внутренних резьб мерным инструментом / Нешта А.А., Криворучко Д.В.//ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК. - Суми: СумГУ, - 2016. - Том 3, № 2. - С. 20 - 24.
5. Нешта А. О. Забезпечення параметрів якості круглої внутрішньої різі при обробці високопродуктивним способом / Нешта А. О. // Mechanics and Advanced Technologies №3 (81), 2017. - С. 10 – 20, DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.107026>
6. DIN 20317 Rock drilling - Round thread connections for percussive drilling equipment - Dimensions, design 2014.
7. Мазур Н. П. Основы теории резания материалов: учебник / Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.: под общ. ред.: Мазура Н. П., Грабченко А. И. — 2-е изд., перераб. и доп. — Х.: НТУ "ХПИ", 2013. — 534 с.
8. Patent WO 2000019056 (2000), Thread coupling for a drill string for percussive rock drilling. Sandström R.
9. Professional Threading Solutions [Електронний ресурс] — Режим доступа до ресурсу: http://www.vargusuk.co.uk/download/files/Oil%20and%20Gas%20EE_140914_web.pdf
10. Berglind, L. and Ziegert, J. (2015), Modulated Tool Path (MTP) “Machining for Threading Applications”, Procedia Manufacturing, 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research, Vol. 1, PP. 546-555, doi: <https://10.1016/j.promfg.2015.09.029>
11. Fromentin, G., Döbbeler, B. and Lung, D. (2015), “Computerized Simulation of Interference in Thread Milling of Non-Symmetric Thread Profiles”, Procedia CIRP 31, 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, vol. 31. pp. 496-501, doi: 10.1016/j.procir.2015.03.018
12. Zhang, Y.Q. and dr. “Development of gas-tight threads based on API round threads and its evaluation”, Natural Gas Industry B (2017), vol. 4, no. 6, pp. 463-469, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.09.008>